

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tartu observatoorium  
Kaugseire osakond

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

**3D FOTOGRAHM-MEETRIA ABIL KUUSEOKSTE EHTUSLIKE  
VARIATSIOONIDE UURIMINE**

**Gregor Jeets**

Praktiline töö

Juhendajad  
Jan Pisek  
Oleksandr Borysenko

Tartu  
2024

# INFOLEHT

## **3D fotogramm-meetria abil kuuseokste ehituslike variatsioonide uurimine**

Metsaökosüsteemide hindamise üheks kõige olulisemaks parameetrik on lehe pindalaindeks (LAI), kuid selle hindamist segab võrade ning võrsete vastastikune varjutamine. Lehtede vastastikuse varjutamise hindamiseks kasutatakse võrse kogupindala ja silueti pindala suhet (STAR). Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida 3D fotogramm-meetria baasil tehtud võrsete mudelite ehituslike variatsioone. Mudelite põhjal leitud STAR väärtuseid võrreldi võrsete vastastikuse varjutamise hindamiseks. Uuringu tulemused näitasid, et sama oksa erinevate aastate võrsed on oma vastastikuse varjutamise poolest sarnaste väärtustega. Uuringus kasutatud sinise valguse 3D fotogramm-meetria meetod tõestas, et tegemist on täpse ning lihtsa viisiga võrsete modelleerimisel.

Märksõnad: 3D fotogramm-meetria, harilik kuusk, võrsed, võrsete struktuur, võrsete vastastikune varjutamine

CERCS kood: T181- kaugseire, B270 - taime ökoloogia

## **Exploring the variation in needle shoot architecture with 3D photogrammetry**

One of the most important parameters for the evaluation of forest ecosystems is the leaf area index (LAI). Its assessment is disturbed by the clumping of crowns and shoots. The ratio of shoot silhouette area to total area (STAR) is used to assess leaf clumping. The aim of this bachelor's thesis was to study the structural variations of shoot models made on the basis of blue light 3D photogrammetry. The STAR values obtained from the models were compared to estimate shoot clumping. The results of the study showed that shoots from different years of the same branch have similar values in terms of their clumping. The blue light 3D photogrammetry method used in the study proved that it is an accurate and simple way of modeling shoots.

Keywords: 3D photogrammetry, Norway spruce, shoots, shoot structure, shoot clumping

CERCS code: T181- remote sensing, B270 - plant ecology

# SISUKORD

INFOLEHT .....	2
1. SISSEJUHATUS.....	5
2. TEOREETILINE TAUST .....	7
2.1 LEHTEDE PINDALAINDEKSI TÄHTSUS .....	7
2.2 VÕRSE SILUETI PINDALA JA VÕRSE KOGUPINDALA SUHE .....	8
2.3 VÕRA GRUPEERUMINE .....	8
2.4 KIIRGUSE HAJUMINE OKASPUU VÕRSELT .....	9
2.5 HARILIK KUUSK .....	10
2.6 MEETODID VÕRSE STRUKTUURI KIRJELDAMISEKS.....	10
2.7 3D FOTOGRAMM-MEETRIA.....	11
3. MATERJALID JA METOODIKA .....	13
3.1 KUUSEOKSA VALIMINE .....	13
3.2 3D FOTOGRAMM-MEETRIA JA SKANEERIMINE.....	13
3.2.1 3D FOTOGRAMM-MEETRIA SKANNER.....	14
3.2.2 SKANEERIMISE PROTSESS .....	15
3.3 MUDELITE KOOSTAMINE SKANEERINGUTE PÕHJAL.....	17
3.4 STAR VÄÄRTUSTE LEIDMINE.....	18
4. TULEMUSED .....	20
4.1 SKANEERIMISTULEMUSED .....	20
4.2 STAR VÄÄRTUSTE VÕRDLUSTULEMUSED .....	22
5. ARUTELU.....	25
6. KOKKUVÕTE .....	27
SUMMARY .....	28
TÄNUAVALDUSED .....	30
KASUTATUD KIRJANDUS.....	31

LISAD.....34

# 1. SISSEJUHATUS

Tänapäeva ühiskonnas pööratakse üha enam tähelepanu ökosüsteemide hoidmisele. Metsaökosüsteemide kohta on Nias (2013: 169) oma artiklis välja toonud järgmise: „Metsaökosüsteemid hõivavad ca 31% Maa pinnast, kus elutsevad üle poolte maismaalooma- ja taimeliikidest.” Guo *et al.* (2023: 267) on esitanud oma töös järgmise väite: „Seejuures loetakse metsaökosüsteeme maismaa biosfääri kõige olulisemateks komponentideks, mis moodustavad ligikaudu 70% maismaaökosüsteemi puhastootlikkusest.” Selleks, et metsaökosüsteeme mõista ja kaitsta, tuleb selle toimumist uurida erinevatel viisidel.

Metsa struktuuril on väga oluline roll kogu metsasüsteemis, kuna struktuur avaldab otseselt mõju päikesekiirguse neeldumisele ja hajumisele (Pisek *et al.* 2023). Metsa ökosüsteemis toimuvad erinevad ringed: toitainete, vee ja süsiniku ringlus. Eelmainitud ringed ning kogu metsasüsteemi funktsioon on otseselt mõjutatud metsa struktuurist. (Shugart *et al.* 2010) Lisaks ringetele mõjutab metsa struktuur tugevalt ka energiavoogusid (Chen *et al.* 2006). Puude struktuuri kirjeldatakse enamasti nende võraelementide kolmemõõtmelise paigutuse kaudu, kus võetakse arvesse lehtede suurust, nende orientatsiooni ja asukohta (Calders *et al.* 2018, Janoutova *et al.* 2021, *cit.* Pisek *et al.* 2023). Need kolm eelmainitud parameetrit määratakse puistu lehtede kogupindala, lehtede nurga jaotuse ja lehtede grupeerumise põhjal (Nilson 1971, Chen ja Black 1992, *cit.* Pisek *et al.* 2023).

Puulehtede fotosünteesi tootlikkust hinnatakse metsasüsteemi uurimise eesmärgil. See saadakse lähtudes lehepindadele langeva fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse kogusest. Lehepindade fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse kogus ei ole rutiinselt mõõdetav. Selle asemel simuleeritakse fotosünteesi tootlikkust kiirgusülekanne mudelitega. (Thérézien *et al.* 2007) Kõnealuste mudelitega samadel põhimõtetel saab kasutada ka optiliselt mõõdetud võra läbilaskvust või peegelduvuse pöördülesande lahendamist ning lehtede pindalaindeksi (LAI) hindamist (Miller 1967, Anderson 1971, Ross 1981, Nilson ja Ross 1997, Knyazikhin *et al.* 1998, *cit.* Pisek *et al.* 2023). Võrastiku fotosünteesi hindamine põhineb enamikel juhtudel lehtede pindalaindeksi kaudsetel hinnangutel. Teiseks fotosünteesi hindamise võimaluseks on mudelite koostamine simuleerides realistlikke võrasid. (Thérézien *et al.* 2007)

Okaspuude puhul mõjutab kiirgusrežiimi võrse okaste paigutus, mis annab võrastiku arhitektuurile struktuuri. Thérézien *et al.* (Knyazikhin *et al.* 1998, Shabanov *et al.* 2000,

Smolander ja Stenberg 2003, 2005, *cit.* Thérézien *et al.* 2007: 1375) uurimuses toodi võra peegeldavate omaduste kohta välja järgnev: „Võra peegelduvaid omadusi mõjutab olulisel määral ka okaste vastastikune varjutamine, mis suurendab võrse mitmekordse hajumise tõenäosust ning omakorda vähendab peegeldumist.” Olulisel kohal on ka võrse silueti pindala ja võrse kogupindala suhe (STAR). Okaspuuvõrade kiirgusrežiimide iseloomustamise seisukohalt on STAR väärtused väga olulised näitajad. (Thérézien *et al.* 2007) STAR kontseptsioon on hea viis ka võra vastastikuse varjutamise hindamiseks ning selle väärtuseid leitakse ning analüüsitakse käesolevas töös.

Uurimus põhineb 3D fotogramm-meetrial, mille abil registreeritakse võrsete 3D struktuur. Seda meetodit peetakse usaldusväärseks, kuna sellega on võimalik vähendada inimlikku eksimust ning kompenseerida ebatäpsuseid (Pisek *et al.* 2023). Selle tulemusena saadakse 3D mudelid kuuse võrsetest, mille järel on võimalik nende struktuuri põhjalikumalt uurida, nende põhjal vastavaid arvutusi sooritada ja saadud materjalidest/tulemustest järeldusi teha. Suurem osa vajalikust informatsioonist saadakse kuusevõrsete pindaladest, mille väärtused leitakse vastavate mudelite põhjal. Nende tulemustega arvutatakse võrsete silueti pindalade ning kogupindalade suhted.

Töö eesmärgid on järgmised:

1. Millised on kuusevõrsete silueti pindalade ja võrsete kogupindalade suhted (STAR)?
2. Kas ja kuidas muutub kuuse okaste struktuur aastakasvude lõikes?

## 2. TEOREETILINE TAUST

### 2.1 LEHTEDE PINDALAINDEKSI TÄHTSUS

Lehtede pindalaindeks ehk LAI on võtmetähtsusega struktuuriomadus metsaökosüsteemidele, sest rohelistel lehtedel on roll kontrollida paljusid bioloogilisi ning füüsikalisi protsesse taimede võrastikes. Ökofüsioloogia, atmosfääri ja ökosüsteemi vastastikuste mõjude ning kõikide globaalsete muutuste uurimiseks on vaja täpseid lehtede pindalaindeksi hinnanguid, mille kaudu saab iseloomustada taimevõrased. (Chen *et al.* 1997) Taimevõrade iseloomustamiseks on peamiseks viisiks lehtede pindalaindeksi mõõtmine (Sellers *et al.* 1986, Running ja Coughlan 1988, Bonan 1993, *cit.* Chen *et al.* 1997). Lehtede pindalaindeksit kasutatakse kahel peamisel eesmärgil: võrastiku fotosünteesi ja transpiratsiooni mõõtmiseks ning võrastiku lehtede peegeldava pinna hindamiseks. Kui madala kasvuga taimestiku (nt põllukultuurid) lehe pindalaindeksi mõõtmisi suudetakse teha väga täpselt, siis suuremates looduslikes ökosüsteemides on need mõõtmised keerulised. Seda seetõttu, kuna lehtede pindala on puidukoest raskesti eristatav ning keeruline on üldistada ühes kohas tehtud mõõtmisi suuremale alale. (Chen *et al.* 1997)

Peamisteks lehe pindalaindeksi mõõtmiseks kasutatakse kaht erinevat meetodit: otsest või kaudset mõõtmist. Otsest mõõtmist kasutatakse meetodid kujutavad endast destruktiivseid proovide võtmisi, varise kogumist ning proovide võtmist punktkontaktidega. Neid meetodeid kasutatakse edukalt põllumajanduses. Metsa korral kasutatakse allomeetrilisi meetodeid, mis sõltuvad ekstrapoleerimisest. Maha langenud lehti on mõistlik uurida ainult lehtmetsade puhul, kuna igihaljastes metsades langenud oksad on seotud ainult selle kasvuaastaga. Punktkontakti meetod ei ole edukalt kasutatav kõrgekasvulistes metsades ning okaspuumetsades okaspuu okaste suure tiheduse tõttu. Seejuures kujutavad kaudsed meetodid endast optiliste instrumentide ja mudelite kasutamist. Neid meetodeid on võimalik kasutada suurtel aladel küllaltki odavalt ning need meetodid on ka kiiremad. Optiliste seadmete töö on takistatud looduslike metsapuistute võraarhitektuuride keerukuse tõttu ning just seepärast tuleb kaudsete tehnikate täiustamiseks teha palju lisatööd. (Chen *et al.* 1997)

Lehe pindalaindeksi ehk LAI mõõtmistehnikad on aja jooksul järjest paranenud. Varasemalt mõõdeti seda väärtust väga töömahukate viisidega käsitsi laboris, kuid tänapäeval suudetakse mõõtmisi sooritada *in situ*. Samuti kasutatakse erinevalt varasemast nüüd ka satelliitsüsteeme.

Näiteks skannersüsteem MODIS ülesandeks on toota mitmeid taimkatet iseloomustavaid suuruseid, mille hulgas on ka LAI (Kodar *et al.* 2008). Kogu senise arengu juures on aga jätkuvalt probleeme LAI väärtuste tõesusega, kuna eelkõige just okaspuistute võrsetes esineb okaste vastastikust varjutamist, mis põhjustab ebatäpseid tulemusi. See on ka kõige põhilisemaks väljakutseks mõõtmaks lehe pindalaindeksi väärtuseid. (Chen *et al.* 2006)

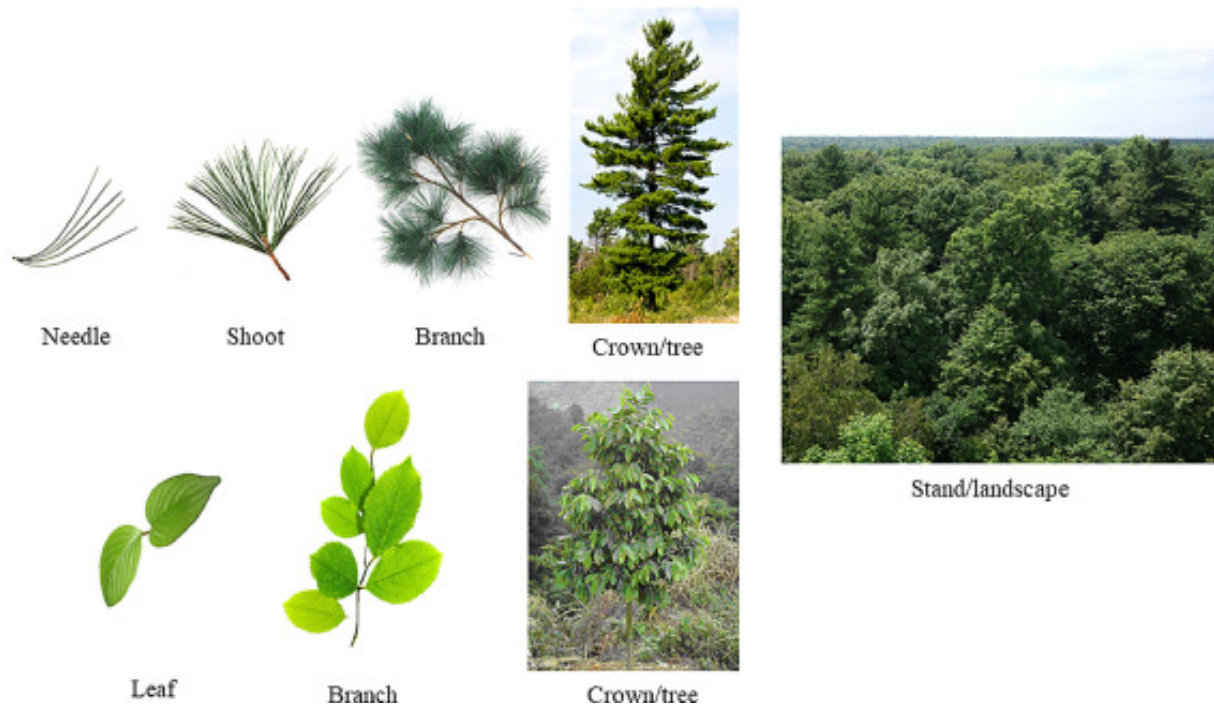
## 2.2 VÕRSE SILUETI PINDALA JA VÕRSE KOGUPINDALA SUHE

Võrse silueti pindala ja võrse kogupindala suhe (STAR) on seotud võrsete vastastikuse varjutamisteguriga. Seda saab omakorda kasutada maapealsete läbilaskvusmõõtmistega saadud LAI väärtuste korrigeerimiseks (Stenberg 1996, Chen *et al.* 1997). Võrse silueti pindala suhe võrse kogupindalasse on Oker-Blom ja Smolander (1988) poolt kasutusele võetud võrse STAR parameeter. Lihtsustatult on kuuse kasvude STAR väärtuste arvutamine meetod, mille kaudu saab hinnata okaspuu võrse valguse läbilaskvuse efektiivsust (ehk kvantifitseerida võra vastastikust varjutamist). Tulemusi hinnates on oluline teada, et mida väiksem on STAR väärtus, seda suurem on võrse vastastikune varjutatus, mis tähendab, et suurema STAR väärtuse korral on võrse vastastikune varjutatus väiksem. Lisaks aitab STAR väärtuste teadmine hinnata lehestiku/okaste kogupindala, mis on oluline teadmine fotosünteesis ja transpiratsioonis. Võrse silueti pindala mõjutavad selle struktuurilised omadused ning need muutuvad sõltuvalt võrse orientatsioonist päikesevalguse suuna suhtes. (Pisek *et al.* 2024) Kuusk *et al.* (2023) on oma uurimuses välja toonud, et võrse silueti pindala kontrollib võrse poolt kiirguse kinnipüüdmist ning spekulatsioonilt peegeldunud kiirguse edasihajumine sõltub võrse silueti kontuuri pikkusest. Lehtpuu lehe silueti ala sõltub lehe pindalast ning selle kaldenurgast (Pisek *et al.* 2024).

## 2.3 VÕRA GRUPEERUMINE

Võra vastastikune varjutamine on suurimaks väljakutseks lehe pindalaindeksi hindamisel. Mida täpsemalt suudetakse hinnata võra vastastikust varjutamist, seda usaldusväärsemad on ka lehe pindalaindeksite tulemused. Lehestiku vastastikust varjutamist jagatakse kaheks: võra sisesed ja võrade vahelised (Ryu *et al.* 2012, Woodgate *et al.* 2016, *cit.* Fang 2021). Võra sisene vastastikune varjutamine laialeheliste metsade puhul on tavaliselt väike ning seega ka mitteoluline (Macfarlane *et al.* 2007b, Ryu *et al.* 2012, *cit.* Fang 2021). Okaspuumetsade korral saame eristada omakorda nelja erineva taseme grupeerumist: võrsed, oksad, võrad ja maastikud

(joonis 1) (Duthoit *et al.* 2008, Fournier *et al.* 1997, Ni ja Woodcock 2000, Oker-Blom 1985, Stenberg *et al.* 2014, *cit.* Fang 2021). Fang (2021: 8) on toonud oma uurimuses välja järgmise: „Võrasisene vastastikune varjutamine hõlmab endas võrse, oksa ja võra tasandeid, võradevahelised grupeerumised on analoogsed maastikute tasemel grupeerumisega.”



**Joonis 1.** Lehestiku grupeerumise tasandid (Fang 2021)

Okaspuu võrade puhul loetakse nende peamisteks võraelementideks võrseid (Fang 2021). Sarnaselt võrasisesele vastastikusele varjutamisele väljendatakse ka võra üldist vastastikust varjutamist nii võrse sisesena kui ka välisena. Võra vastastikuse varjutamise hindamise üheks võimaluseks on leida STAR väärtused, mida kasutatakse ka käesolevas töös.

## 2.4 KIIRGUSE HAJUMINE OKASPUU VÕRSELT

Laialehelise puu võras on kiirguse hajumise mustri moodustavaks põhielemendiks puuleht. Okaspuude puhul on kiirguse hajumise põhielemendiks puu võrsed. Okaspuu okaste kumer pind hajutab okka pinnal oleva peegelduse kogu sfääri. Sellest tulenevalt sõltub okaspuu võrse kiirguse hajumise detailne muster võrse ehituslikust struktuurist. Seetõttu on võrreldes laialeheliste puudega keeruline kirjeldada kogu okaspuuvõrsete struktuuri ning okaspuude kiirgusülekanne mudelid pole olnud piisavalt täpsed. Sinise valguse 3D fotogramm-meetria

areng on loonud võimaluse koguda suures koguses punktpilvi, mis suudavad objekti pinda täielikult reprodutseerida. (Kuusk *et al.* 2023)

## 2.5 HARILIK KUUSK

Harilik kuusk (*Picea abies*) (joonis 2) kasvab suures osas Põhja-Euroopas ning Eestis on see väga levinud. Kuusikud moodustavad Eesti metsade kogupindalast 25%. Harilik kuusk kasvab tavaliselt kuni 30 meetri kõrguseks, kuid viljaka mullaga kasvukohas võib puu kõrgus ulatuda ka kuni 60 meetrini. Hariliku kuuse vanus võib ulatuda 250 aastani. Sellel puul on tumerohelised, läikivad ning 1,3-2,5 cm pikkused terava tipuga okkad. Need kinnituvad kuuse oksale ühekaupa ja keskmiselt püsivad okkad puul 6-7 aastat. Kuuseokkaid saab veel kaheks jaotada: valguse- ja varjuokkad. (Harilik kuusk 2022)



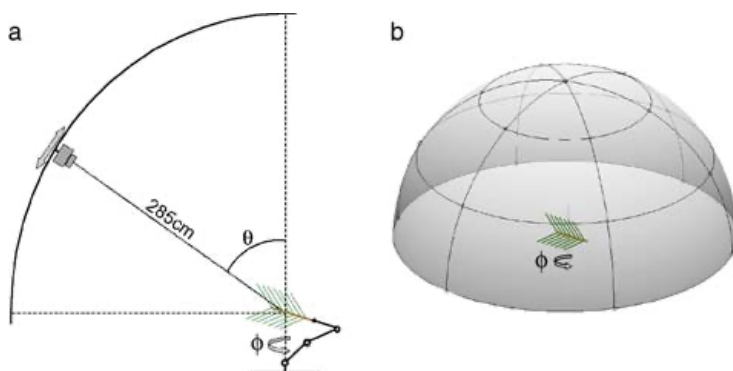
**Joonis 2.** Harilik kuusk (uuritav puu Tõraveres)

## 2.6 MEETODID VÕRSE STRUKTUURI KIRJELDAMISEKS

Niinemets *et al.* (2006) männivõrsete omaduste analüüsimisel kasutati võrse silueti pindala mõõtmiseks optilist mõõtmist, kus võrset pööratakse fikseeritud kaamera ees, mis sooritab iga nurga alt pildi. Igalt pildilt eraldati võrse silueti ala ning arvutati sfääriline keskmine. Tegemist on aeganõudva meetodiga, kuid see on sobilik just lühikeste ja jäikade okastega võrsete puhul.

Keerulise struktuuri ning võrsete jäikuse tõttu on määndide ning kuuskede puhul eelmainitud meetod sobilik, kuna see väldib rohkem vigu võrreldes klassikalise pildistamismeetodiga. (Thérézien *et al.* 2007)

Chen *et al.* (1997) uuringus kasutati okaspuuvõrsete sisese okaste grupeerumise määramiseks videokaamerat ja pöörleva valguslaua süsteemi. Thérézien *et al.* (2007) kasutasid oma uurimuses fotokaamerat (Nikon E8700 digital camera, Japan), mis oli kinnitatud kaarekujulise konstruktsiooni külge (Joonis 3). Kaamera suunati keskmee olevale võrsele. Võrsed kinnitati alusele, mida sai pöörata. See välistas käega pööramisel tekkivad vead. (Thérézien *et al.* 2007)



**Joonis 3.** Aparatuuri skemaatiline joonis Thérézien *et al.* (2007) uuringus

2023. aastal tehtud uuringus kasutasid Pisek *et al.* esmakordselt sinise valguse 3D fotogrammeetria meetodit. Seda meetodit kasutatakse ka käesolevas töös. Fotogrammeetria skaneerimine on rohkem automatiseeritud meetod kui varasemad võrsete skaneerimise meetodid. Samuti on teised meetodid töömahukamad võrreldes sinise valguse 3D fotogrammeetriaga skaneerides, kuna punktipilvede põhjal valmivad väga detailsed võrsemudelid. Varasemad meetodid ei arvesta okaspuuvõrsete puhul nii palju okaste grupeerumisega, kui seda võimaldab 3D fotogrammeetria meetod. (Pisek *et al.* 2023)

## 2.7 3D FOTOGRAMM-MEETRIA

Eelkõige tegeleb fotogrammeetria kolmemõõtmeliste objektide ja maastikuomaduste täpsete mõõtmiste tegemisega. See meetod toimib stereo-foto printsiibil, mis võimaldab baasi ja nurkade abil arvutada objekti kauguse. Selleks objektiks võib olla maja maapinnal (lennukilt vaadates) või kuuseokka pinna ebatasasus. Erinevus on objektide mastaabis, aga printsiip on sama. Käesolevas töös kasutatakse lähifotogrammeetria meetodit, kus kaamera on

paigaldatud selleks ettenähtud statiivi külge. Pisek *et al.* (2023) olid esimesed, kes kasutasid sinise valguse 3D fotogramm-meetriat okaspuuvõrsete modelleerimiseks.

### 3. MATERJALID JA METOODIKA

#### 3.1 KUUSEOKSA VALIMINE

Esimeseks praktilise osa etapiks oli kuuse valimine. Kuna suurem osa praktilisest tööst leidis aset Tõravere observatooriumis, osutus uuritavaks puuks just sealsel alal paiknev kuusk. Täpsemalt valiti uuritavaks puuks harilik kuusk (*Picea abies*) (joonis 2), mis asus observatooriumi vahetus läheduses (asukoht koordinaatidega 58,26407° N, 26,46788° E). Kuuse valimise järel lõigati 25. septembril 2023 teleskoop-oksalõikuriga piisavalt suur oks, mille küljes oleksid mitme erineva aasta kasvud. Seejärel eraldati laboris noa abil iga aasta kasv, mille tulemusena saadi 4 erineva aasta võrsed. Selle etapiga lõppes ka võrsete ettevalmistus skaneerimiseks.



**Joonis 4.** Illustratiivne pilt valitud kuuseoksast



**Joonis 5.** Illustratiivne pilt uuritavatest aastakasvudest

#### 3.2 3D FOTOGRAMM-MEETRIA JA SKANEERIMINE

Käesolevas uurimuses kasutatakse sinise valguse 3D fotogramm-meetria skaneerimist. Tegemist on tõhusa meetodiga kuusevõrsete vastastikuse varjutamise hindamiseks. Sinine valgus ning kaks kaamerat töötavad stereokaamera põhimõttel, millega tehakse objektist

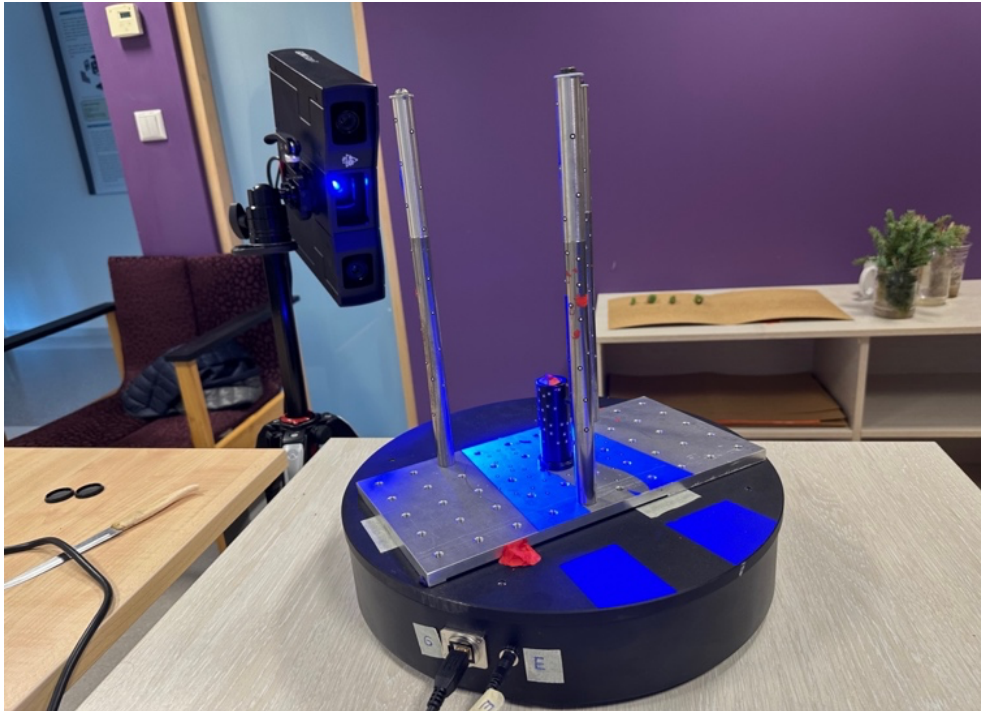
rohkelt stereopilte erinevates suundades. Selle tulemusena saab eristada suure hulga objekti pinna punkte, mis kokku moodustuvad kogu võrset kujutava 3D punktpilve.

### 3.2.1 3D FOTOGRAMM-MEETRIA SKANNER

Võrsete skaneerimiseks kasutati sinise valguse 3D skannerit GOM *Scan 1* (tabel 1). Skanner kasutab sinist valgust ning stereokaamera põhimõttel töötavat kahte kaamerat, mille tulemusena tagab skanner täpsuse ning detailse eraldusvõime. Lisaks skannerile kasutati ka automatiseeritud pöörlemislauda GOM ROT 350, mis oli ühendatud skanneriga läbi arvuti ning hallatud programmiga GOM *Software* (GOM *Inspect v 2.0.1*).

Parameeter	Väärtus
Tootja	Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Saksamaa
Versioon	MV 200
Mõõteala	20cm×12.5cm
Töökaugus	45 cm
Punkte skaneerimise kohta	6 millionit
Punkti kaugus	0.06 mm
Valgusallikas	LED
Skanneri mõõtmed	29cm×21.5cm×80cm
Skanneri kaal	~2,5kg

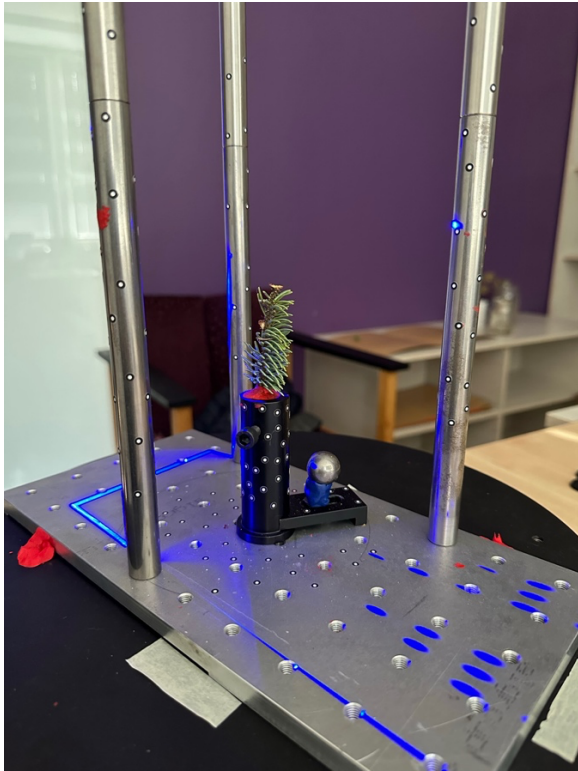
**Tabel 1.** Tehnilised andmed GOM *Scan 1* seadme kohta (Pisek *et al.* 2023)



**Joonis 6.** 3D fotogramm-meetria skanner COM *Scan 1* ja automatiseeritud pöörlemislaud GOM ROT 305

### 3.2.2 SKANEERIMISE PROTSESS

Enne skaneerimist tuli selgeks teha kasutatava skanneri töötamisviis ning selleks kasutatavad programmid. Ettevalmistatud kuusevõrseid skaneeriti ükshaaval, kinnitades need plastiliini abil pöörlemislaua külge. Kõiki uuritavaid võrseid skaneeriti sarnaselt Pisek *et al.* (2023) poolt järgi katsetatud kolme erineva seniitnurga alt:  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $100^\circ$ . Esimese skaneeringu eel (seniitnurgaga  $30^\circ$ ) fikseeriti paika kaamera horisontaalasend, mida kasutati ka järgmistel skaneerimistel.



**Joonis 7.** Võrse on kinnitatud plastiliiniga automatiseeritud pöördlaua külge ning on valmis skaneerimiseks

5 minuti jooksul tehti kuni 60 skaneeringut, mis hõlmasid võrse 360° vaadet iga skanneri positsiooni kohta. Skaneeringute arv varieerus vastavalt proovidele, kuna võrsed on erineva struktuurilise keerukusega. Skaneeringute arv oli suurem, kui võrsel oli rohkem okkaid, keerulisem struktuur ning kui võrse kasv oli kõrgem. Kogu skaneerimisprotsess seadistati enne skaneerimist, mille tulemusel toimus skaneerimine automatiseeritult. Skaneerimistäpsuse saavutamisel mängisid olulist rolli pöördlaual olevad postid, mille peale olid kleebitud võrdluspunktid, mis olid varasemalt järele testitud.

Tumedad ning heledad pinnad vajavad sobiva hulga peegeldunud valguse jäädvustamiseks erinevaid valgustusaegu. Varasemalt sarnaste objektide peal järele katsetatud töökindlateks valgustusaegadeks on valitud 16,81 ms ja 26,67 ms, millega on saadud parimad tulemused (Pisek *et al.* 2023). Pisek *et al.* (2023) on kasutanud oma töös võrdluspunktide säritusajaks 8,40 ms. Käesolevas töös on kasutatud samasuguseid valgustusaegasid nagu kasutasid Pisek *et al.* 2023. aastal tehtud uuringus. Olenevalt võrse keerukusest kasutati ühe võrse kohta 90-180 skaneeringu võtet, mida kontrolliti visuaalselt eesmärgiga, et vältida suuri tühikuid mudelites.

Skaneerimise järel eemaldati skaneeritud mudelilt taust ning seejärel hakati sulgema allesjäänud tühimikke käsitsi selleks ettenähtud programmis (*GOM Inspect software*).

Eelnevalt kirjeldatud skaneerimisel valminud mudeleid kasutati võrse pindala määramiseks. Järgmise etapina lasti neljal uuritava võrsel kuivada senikaua, kuni oli võimalik eemaldada võrse küljest okkad. Rootsude kogupindala hindamiseks skaneeriti need pärast okaste eemaldamist.



**Joonis 8.** Võrsetelt on eemaldatud kuuseokkad, et skaneerida võrse rootsud ka ilma okasteta



**Joonis 9.** Võrse roots (ilma okasteta) on kinnitatud plastiliiniga automatiseeritud pöördlaua külge ning on valmis skaneerimiseks

### 3.3 MUDELITE KOOSTAMINE SKANEERINGUTE PÕHJAL

Skaneeritud punktpilvedel oli esialgu palju tühimikke. Kuuseokkad paiknevad ehituslikult väga erineva nurga all ning pealtvaates katavad need kohati ära kuuseoksa pinna ning skanner ei suutnud paljudel juhtudel skaneerida kogu võrset tervikuna. Seetõttu tuli kõik struktuurid täpselt üle kontrollida ning teha käsitsi vastavad parandused. Kontrollimise ning paranduste protsessid viidi läbi selleks ettenähtud programmis *GOM Inspect software* v 2.0.1.

Programmi kasutamiseks tuli selgeks õppida vajalikud käsklused ning seejärel tehti vajaminevad parandused. Kuna kuuseokkad asetsevad erinevate nurkade all, ei suutnud skanner terviklikke pinna mudeleid kokku panna. Seetõttu oli esialgses mudelis palju täitmata tühimikke, mis tuli parandada programmis vastava käsklusega. Keerukamate struktuuride korral skaneeris skanner okkad eraldiseisvate objektidena (puudus ühendus okka ning oksa vahel). Seda tuli samuti parandada vastava käsklusega, mille abil sai luua silla kahe objekti vahele ning selle kaudu omakorda tekitada struktuur. Skaneerimise ja mudelite korrastamise käigus tekkis palju võõrelemente (prügi), mida sai nähtavaks värvida (*invert selections*) ning seejärel käsklusega kustutada (*delete*). Lisaks eelnevatele põhilistele käsklustele kasutati mudelite koostamiseks ka keerukamaid käsklusi: *Select triangle* (käsklus kolmnurga valimiseks töödeldavalt alalt); *Select along line* (pinna valimine mööda muudetavat joont); *Select boundary* (pinna valimine mööda piirjoont); *Select patch* (struktuuri valimine).

Skaneeritud ja lõplikult parandatud võrsete ning neile vastavate okste mudelid eksporditi .stl formaati, et oleks võimalik kasutada neid programmis *MeshLab*. See programm on oluline tööriist saamaks võrsete pindalaid töödeldud mudelite põhjal. Saadud pindalade baasil arvutatakse otsitavad STAR väärtused.

### 3.4 STAR VÄÄRTUSTE LEIDMINE

STAR väärtuste arvutamine teostati Kuusk *et al.* (2023) välja töötatud viisil. Ühe tasapinnalise lehe silueti pindala sõltub lehe pindalast ning selle kaldenurgast.  $S_{s,L} = S_{leaf} \cos(\theta_L) / 2$ , kus  $S_{leaf}$  on lehe kogupindala ning  $\theta$  on nurk lehe normaal- ja vaatesuuna vahel. Võrse projektsiooniala oleneb võrse orientatsioonist ning okka projektsioonide kattumisest. Kui okkad ei kattunud, siis võrse silueti pindala oli  $S_s = \sum S_{s,n}$ . Okka projektsioonide kattumine vähendab võrse silueti pindala:  $S_s \rightarrow \xi \sum S_{s,n}$ , ja  $STAR = \xi \sum S_{s,n} / S_{total}$ . Sümbol  $\xi$  on kattuvuse mõõt, mis sõltub võrse struktuurist ning selle orientatsioonist. (Pisek *et al.* 2024)

Võrse silueti pindala on määratav punktpilve järgi. 3D-skanner tagastab tabamuste koordinaadid, millel pole suurust. Silueti pindala ja kontuuri pikkuse ( $lc$ ) arvutamiseks diskreteeriti x-y tasand 0,1 mm piksliteks ning vähemalt ühe projitseeritud tabamusega pikslid said väärtuse 1. Silueti mustvalget rasterpilti analüüsiti tarkvaraga *ImageMagic* (2022), kus kasutati protseduure *Edge detect* ning *Identify*. Nullist erinevate väärtustega pikslite arv on

silueti pindala väärtus ja äärmiste pikslite arv on silueti kontuuri pikkus. (Pisek *et al.* 2024)  
Silueti kontuuri pikkus ja STAR parameeter on omavahel seotud regressioonivalemiga:

$$l_c = a + b * STAR. \quad (1)$$

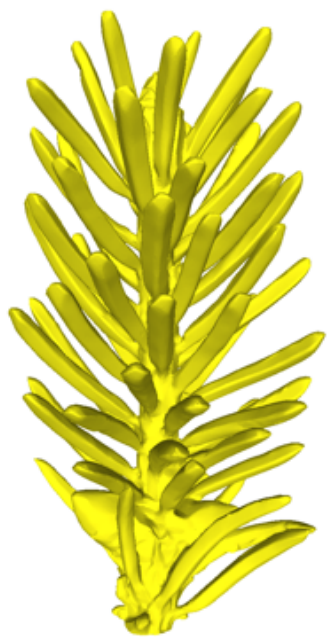
Parameetrid  $a$  ja  $b$  on regressiooniseose tõus ja nihe. Seoses  $l_c = l_c (STAR)$  lineaarsuse lähendi mõõduks on korrelatsioonikoefitsient  $r$ .

## 4. TULEMUSED

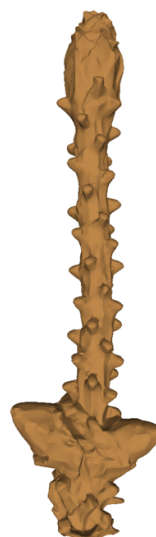
Tulemuste peatükis tuuakse välja töö käigus saadud tulemused mudelite kujul ning võrse kogupindala ja võrse silueti pindala suhete (STAR) väärtuste põhjal saadud võrdlused. Tulemuste visualiseerimiseks on toodud võrsete pindaladel põhinev graafik. Arutelu peatükis antakse vastus töö eesmärgile ja arutletakse selle käigu üle.

### 4.1 SKANEERIMISTULEMUSED

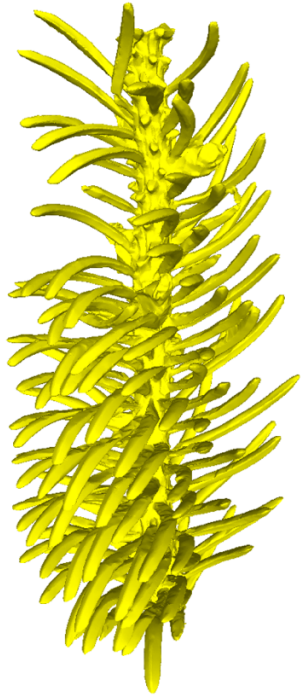
Skaneerimise ning sellejärgse mudelite töötlemise tulemusena saadi igast uuringu jaoks väljavalitud kuusevõrsest sellele vastav mudel (joonis 10 kuni 17). Saadud mudelite (okastega võrse mudelid ja rootsu mudelid) pildid on välja võetud programmist *MeshLab* ning need on toodud allpool.



**Joonis 10.** Esimese võrse skaneeritud mudel okastega



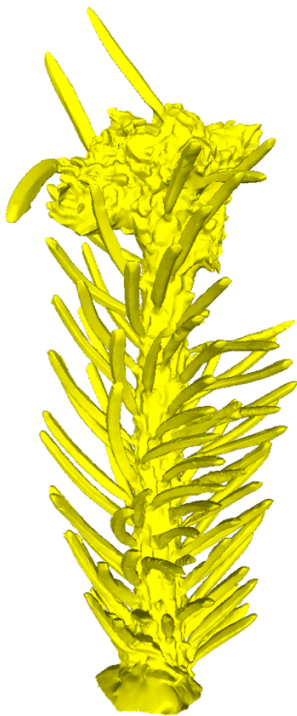
**Joonis 11.** Esimese võrse skaneeritud roots ilma okasteta



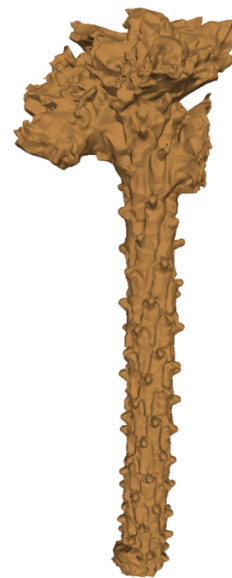
**Joonis 12.** Teise võrse skaneeritud mudel okastega



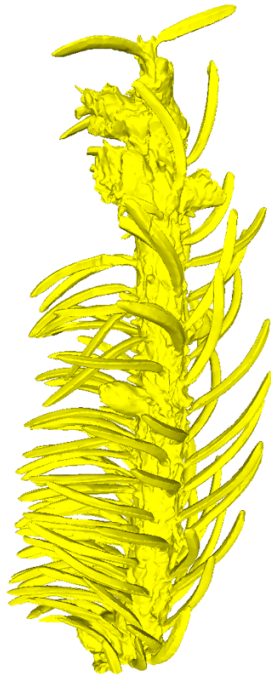
**Joonis 13.** Teise võrse skaneeritud roots ilma okasteta



**Joonis 14.** Kolmanda võrse skaneeritud mudel okastega



**Joonis 15.** Kolmanda võrse skaneeritud roots ilma okasteta



**Joonis 16.** Neljanda võrse skaneeritud mudel okastega

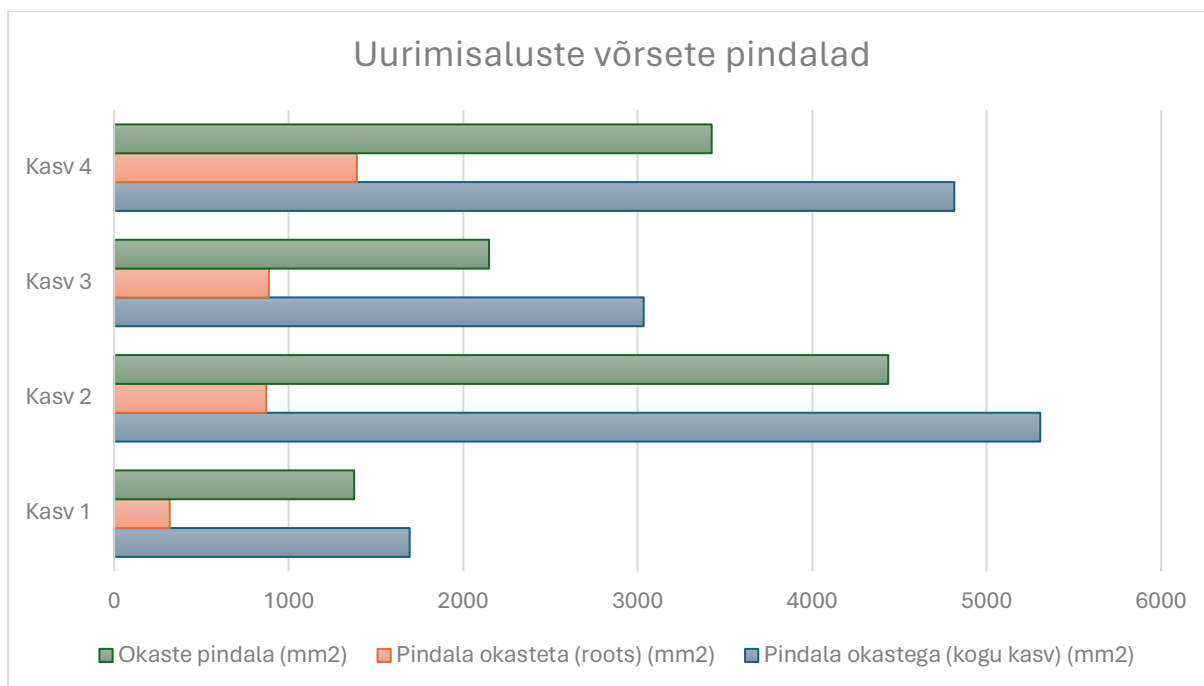


**Joonis 17.** Neljanda võrse skaneeritud roots ilma okasteta

Saadud mudelite ning võrsete piltide põhjal läbi viidud visuaalsel vaatlusel võib väita, et sinise valguse 3D fotogramm-meetria põhimõttel skaneerimine on täpne meetod. See meetod on võimeline saavutama väga suurt punktpilvede tihedust ka pisikeste okaste jaoks (<10 mm). Omakorda võimaldab see täpset pindalade rekonstrueerimist järeltöötamise käigus.

## 4.2 STAR VÄÄRTUSTE VÕRDLUSTULEMUSED

Saadud mudelite põhjal arvutati võrsete kogupindala koos okastega, mille saamiseks kasutati programmi *MeshLab*. Seejärel leiti samas programmis pindalad vastavate võrsete rootsude mudelitele. Leitud tulemused on visualiseeritud joonisel 18 ning toodud tabelina lisa 1.



**Joonis 18.** Uurimisaluste võrsete pindalad graafilises võrdluses

Nagu graafikult näha, on erinevate aastate võrsed väga erinevate pindaladega. Kui võrrelda võrsete kogupindala (koos okastega), siis suurim võrse kogupindala väärtus oli 5306,9 mm<sup>2</sup> (kasv 2 (joonis 12)). Seejuures oli väikseim võrse kogupindala 1693,0 mm<sup>2</sup> (kasv 1 (joonis 10)). Sellest tulenevalt võib väita, et erinevate aastate kasvud on väga erineva suurusega. Võrreldes võrsete kogupindalade ning okaste pindalade suhet, on need igal aastakasvul sarnase vahekorraga. Kasv 4 (joonis 17) rootsu pindala on 1390,4 mm<sup>2</sup>, mis on suurem kui kasv 2 (joonis 13) rootsu pindala (871,4 mm<sup>2</sup>). Samas kui võrrelda nende samade kasvude kogupindalaid, on kasv 2 (joonis 12) kogupindala (5306,9 mm<sup>2</sup>) suurem kui kasv 4 (joonis 16) kogupindala (4818,4 mm<sup>2</sup>). See tähendab, et kasv 2 (joonis 12) okaste pindala suhe võrse kogupindalasse oli suurem kui kasv 4 (joonis 16) okaste pindala ehk rootsu pindala kasv 4 (joonis 16) korral moodustas suurema osa kogupindalast kui kasv 2 (joonis 12) rootsu pindala.

Uurimisaluste võrsete keskmised STAR väärtused (tabel 2) jäid vahemikku 0,13-0,15, mis näitab, et erinevate aastakasvude STAR väärtuste varieerumine on väike. Võrreldes erinevate aastate kuusevõrseid võime näha väga erinevaid võrse kogupindalaid, kuid võrreldes samade võrsete STAR väärtusi, ei ole nende erinevus suur. Tulemustest selgus, et kogupindalalt kõige väiksema kasvu (kasv 1 (joonis 10)) STAR väärtus on uuritavatest võrsetest kõige suurem.

Kõige väiksema STAR väärtuse sai aga kõige suurema kogupindalaga kasv (kasv 2 (joonis 12)).

Võrsed	Võrse pindala (mm <sup>2</sup> )	STAR keskvärtus	Standardhälve	Mediaan
1	1693,0	0.1472	0.0214	0.1523
2	5306,9	0.1260	0.0157	0.1283
3	3034,2	0.1434	0.0261	0.1504
4	4814,4	0.1376	0.0271	0.1404

**Tabel 2.** Võrsete STAR keskvärtused, võrsete kogupindalade, standardhälvete ning mediaanide tulemused tabeli kujul

Võrse silueti kontuuri pikkus  $l_c$  on sarnaselt pindaladele erinevatel aastatel väga varieeruv (tabel 3). Kõige väiksema võrse silueti pikkus oli 248,6 mm (kasv 1 (joonis 10)) ning kõige pikema silueti väärtus 578,4 mm (kasv 2 (joonis 12)). Silueti pikkuste standardhälbed on samuti erinevad 64,1-167,6. Sarnaselt varieeruvad ka mediaani väärtused vastavalt aastatele 262,1-583,7. STAR keskvärtuste ning mediaani erinevus näitab, et STAR jaotus ei ole sümmeetriline. Kui võrrelda võrse silueti kontuuri pikkust, siis tulemustest selgub, et kõige väiksema silueti pikkusega võrse (kasv 1 (joonis 10)) STAR väärtus on uuritavatest võrsetest suurim, mis tähendab seda, et võrses esineb kõige vähem vastastikust varjutamist. Kõige pikema silueti kontuuri pikkusega võrse (kasv 2 (joonis 12)) STAR väärtus on neljast uuritavast kõige väiksem ehk esineb enim vastastikust varjutamist.

Võrsed	$l_c$ väärtus (mm)	Standardhälve	Mediaan	Korrelatsiooni-koefitsient $r$	a	b	Rootsu pindala (mm <sup>2</sup> )
1	248,6	64,1	262,1	0,9213	-158	2765	318,0
2	578,4	167,6	583,7	0,9204	-659	9817	871,4
3	400,5	120,3	427,6	0,9477	-226	4372	886,3
4	540,3	160,5	573,8	0,9655	-246	5713	1390,4

**Tabel 3.** Võrsete silueti kontuuri pikkuste keskvärtuste, standardhälvete, mediaanide, oksade pindalade ning regressiooni valem (1) parameetrite väärtused

## 5. ARUTELU

Varasemalt on kasutatud kuuse võrsete uurimiseks erinevaid optilisi meetodeid ning käesolevas töös käsitletud sinise valguse 3D fotogramm-meetria võeti võrsete uurimiseks kasutusele esmakordselt Pisek *et al.* 2023. aasta töös. Thérézien *et al.* (2007) kasutasid oma uurimuses fotokaamerat, millega tehti võrsetest pilte erinevate nurkade alt. Fotokaameraga tehtud uuringus tuli Thérézien *et al.* (2007) mõõta 12 erinevat parameetrit, et saada analüüsitavast võrsest terviklik mudel. Sinise valguse 3D fotogramm-meetria on meetod, kus ei ole tarvis sellisel viisil parameetreid arvutada. Mudelid saadakse automatiseeritud skaneerimise teel. Modelleerimise seisukohalt on tegemist palju lihtsama ning mugavama lähenemisega.

3D fotogramm-meetria meetodil skaneerimine aitab jõuda lähemale tõesematele mõõtmistele ning kasvatada teadmisi väheuuritud okaspuu okaste koondumise ning võrse arhitektuuri kohta üldisemalt. Saades tõeseid mudeleid võrsetest, tekib võimalus saada ka usaldusväärsemaid ning täpsemaid tulemusi nende hindamiseks. Omakorda on sellest andmestikust kasu kiirguslevi kirjeldamisel okaspuumetsa võrastikus ning sealtkaudu metsa peegeldusomaduste kujunemise ja metsa fotosünteesi hindamisel.

STAR väärtuste võrdlemisel saadud tulemused jäid kõigi nelja võrse puhul samasse vahemikku 0,13-0,15. Võrreldes Thérézien *et al.* (2007) varasemas uuringus leitud hariliku kuuse (*Picea abies*) STAR väärtustega, on tulemused üsna erinevad. 2007. aastal tehtud uuringus jäid hariliku kuuse STAR väärtuste tulemused vahemikku 0,15-2,2 ning võrreldes käesolevas uuringus saadud STAR väärtustega olid nende saadud väärtused kõrgemad. See tähendab, et Thérézien *et al.* (2007) uuritud kuusevõrsetes esines vähem vastastikust varjutamist kui käesolevas töös uuritud võrsetes. Thérézien *et al.* (2007) kõige madalam STAR väärtus oli võrdväärne käesoleva uurimuse kõige kõrgema STAR väärtusega, mis iseloomustab võrse vastastikuse varjutamise erinevusi.

Kui tulevikus viia läbi sarnaseid uuringuid samu meetodeid kasutades ning lisaks võtta arvesse meteoroloogilisi andmeid vastavate võrsete kasvamise aastate kohta, tekib võimalus saada informatsiooni ka ilmastikutingimuste mõjutustest. Neid andmeid liites on võimalik leida rohkem informatsiooni selle kohta, kuidas ilmastikutingimused mõjutavad võrsete kasvamist. Näiteks kuivema aastaaja jooksul võib kuuse kasv olla oluliselt väiksemate okastega ning ka

kogu võrse pikkus võib olla väiksem. Niiskemal aastal (harilikule kuusele soodsamates tingimustes) võib jällegi kuuse võrse kasv olla pikem ning ka okaste suurus olla suurem.

## 6. KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti hariliku kuuse 4 erineva aasta võrseid, millest moodustati mudelid ning leiti võrsete pindalad. Töö eesmärk oli kasutada sinise valguse 3D fotogramm-meetriat kuusevõrsete modelleerimiseks ning saadud mudelite põhjal leida võrsete pindalad. Neid analüüsiti võrsete kogupindala ning võrsete silueti pindala suhete (STAR) väärtuste võimaliku varieeruvuse leidmiseks samast oksaharust, kuid erinevate aastakasvude vahel. Täiendavalt uuriti kirjandusele tuginedes ka lehtede pindalaindeksi ning võra vastastikuse varjutamise/grupeerumise teoreetilist tausta.

Okaspuude võrsete silueti pindala ja kogupindala suhte uuringuid on varasemalt tehtud, kuid kasutatud on väga erinevaid meetodeid võrsete modelleerimisel. 3D fotogramm-meetria kasutamist sarnastes uuringutes on varasemalt tehtud paaril korral. Kasutatud skaneerimise protsess oli automatiseeritud ning seega küllaltki kiire. Töömahukam protsess oli skaneerimisjärgne võrsete tühimike täitmine programmis, kuid see sõltub skaneeritava objekti struktuurilisest keerukusest. Skaneeritud mudelid on väga sarnased uuritavate võrsetega ning see on hea põhjendus, miks peaks tulevikus just sinise valguse 3D fotogramm-meetriat kasutama sarnastes uuringutes.

Kuna mudelite tulemused olid väga sarnased uuritavate võrsetega, võib sinise valguse 3D fotogramm-meetria skaneerimist lugeda usaldusväärseks okaspuu võrsete struktuuri hindamise meetodiks. Saadud sarnaste võrsemudelite kogupindalade ning silueti pindalade leidmise teel on võimalik leida täpsed võrse kogupindala ning võrse silueti pindalade suhted (STAR). STAR väärtuste hindamine on hea meetod, mille tulemusena on võimalik saada täpsemaid lehe pindalaindeksi väärtusi.

Varasemalt on käesolevas töös kasutatud meetoditega sarnaseid uuringuid tehtud vähe ning sellest tulenevalt võiks sellest tööst olla kasu taimkatte kaugseire valdkonnale, näitamaks, et 3D fotogramm-meetria on tõhus meetod võrsete vastastikuse varjutamise hindamiseks. Kui selle tulemusena suudetakse toota okaspuuvõrsete vastastikuse varjutamise kohta rohkem täpsemaid uuringuid, paraneb ka lehe pindalaindeksite uuringute usaldusväärsus. See annab omakorda täpsema ülevaate metsa struktuurist, millest sõltub kogu päikesekiirguse neeldumine ning peegeldumine metsas. Selle kõige lõpptulemusena võiks oluliselt paraneda ka metsaökosüsteemide uuringute täpsus.

## **Exploring the variation in needle shoot architecture with 3D photogrammetry**

**Gregor Jeets**

### SUMMARY

Forest ecosystem is one of the most important ecosystems in Earth biosphere and therefore it is essential to analyze it. Leaf area index is one of the main parameters to evaluate the ecosystem of forest. Canopy clumping specifies the spatial distribution of leaves or needles within a vegetation canopy. The information of clumping helps to understand the radiation transfer through photosynthesis, canopies and hydrological processes. Clumping is related to leaf silhouette area and leaf total area ratio (STAR) because it is possible to correct assessments of ground-measured leaf area index with STAR results. STAR values were found in this thesis to characterize structural differences between the shoots.

Forest leaf clumping can be classified into two categories: between-crown and within-crown. In coniferous forest the clumping effect can occur on four levels: shoots, branches, crowns and landscapes. The main aim for this thesis was to evaluate if the shoot level clumping may vary between shoots from different years. One possible way to quantify shoot level clumping is through leaf silhouette area and leaf total area ratio (STAR). STAR values can be found from the 3D models of the shoots.

The studied sampled Norway spruce tree was chosen from Tõravere. Selected branch was collected using a telescopic tree pruner. Four different shoots from different years were cut from the branches in the laboratory. After that, the shoots were ready to scan.

In this thesis the 3D photogrammetry scanning goal was to find the STAR values and to evaluate their variations between shoots from different years. Blue light and two cameras working on a stereo camera principle can deliver precise scans with high resolution. The camera takes many stereo photos from different angles. The result is a big point cloud which forms the structural model of the scanned target (shoot). After scanning, all remaining gaps in the models were closed manually in GOM Inspect software.

As a result of this work models of the shoots and twigs were created. MeshLab program was used to find the areas of these models. The method for finding the STAR values developed by Kuusk *et al.* (2023) was adopted in this work. As a result of the research STAR values were between 0,13-0,15 (bigger STAR means smaller clumping). The values of different shoots were analyzed, and the studies showed that the smallest shoot had the biggest clumping and the longest shoot had the smallest clumping. Overall, the variation in STAR values between shoots from different years was rather small. This thesis presents 3D photogrammetry as a good, efficient method to evaluate the shoot clumping.

## TÄNUAVALDUSED

Autor soovib tänada oma juhendajaid Jan Pisekit ja Oleksandr Borysenkot abi, toetuse ning põhjaliku tagasiside eest. Lisaks soovib autor tänada Andres Kuuske andmete töötlemise, põhjaliku tagasiside ning eestikeelse terminoloogiaga nõustamise eest.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Anderson, M., C. 1971. Radiation and crop structure in plant. Photosynthetic Production. *The Hague*, 412–466.
2. Bonan, G. B. 1993. Do Biophysics and Physiology Matter in Ecosystem Models?. *Climate Change*, **24**, 281–285.
3. Calders, K., Origo, N., Burt, A., Disney, M., Nightingale, J., Raumonon, P., Åkerblom, M., Malhi, Y., Lewis, P. 2018. Realistic forest stand reconstruction from terrestrial LiDAR for radiative transfer modelling. *Remote Sensing*, **10**, 933.
4. Chen, J. M., Black, T. A., 1992. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **60**, 249–266.
5. Chen, J. M., Govind A., Sonnentag O., Zhang Y., Barr A., Amiro B. 2006. Leaf area index measurements at Fluxnet- Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, **140**, 257–268.
6. Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., Plummer, S. 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **102**, 29429–29443.
7. Duthoit, S., Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J., Martin, E., Roujean, J. 2008. Assessing the effects of the clumping phenomenon on BRDF of a maize crop based on 3D numerical scenes using DART model. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 1341-1352.
8. Fang, H. 2021. Canopy clumping index (CI): A review of methods, characteristics, and applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, **303**, 108374.
9. Fournier, R. A., Rich, P. M., Landry, R. 1997. Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 29445–29454.
10. Guo, Q., Su, Y., Hu, T. 2023. Estimation of Forest Functional Attributes. *LIDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology*, **chapter 8**, 267-292.
11. Harilik kuusk (2022). *Tartu Ülikooli Loodusteadusliku hariduse keskuses, endises Loodusteaduste didaktika lektoraadis valminud veebipõhised õpikeskkonnad*. Viimati vaadatud 13.05.2023. <https://bio.edu.ee/taimed/okaspuu/kuusk2.htm>
12. Janoutova, R., Homolova, L., Novotný, J., Navratilova, B., Píkl, M., Malenovský, Z. 2021. Detailed reconstruction of trees from terrestrial laser scans for remote sensing and radiative transfer modelling applications. *In Silico Plants*, 3.
13. Knyazikhin, Y., J.V. Martonchik, R.B. Myneni, D. Diner ja S.W. Running. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of

- absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **103**, 32,257-32,275.
14. Kodar, A., Kutsar, R., Lang, M., Lökk, T., ja Nilson, T. 2008. Leaf area indices of forest canopies from optical measurements. *Baltic Forestry*, **14 (2)**, 185–194.
  15. Kuusk, A., Borysenko, O., Pisek, J. 2023. Optical model of a conifer shoot. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **310**, 108715.
  16. Macfarlane, C., Hoffman, M., Eamus, D., Kerp, N., Higginson, S., McMurtrie, R., Adams, M. 2007. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, **143**, 176-188.
  17. Miller, P., C. 1967. Leaf temperature, leaf orientation, and energy exchange in quaking aspen (*Populus tremuloides*) and Gambell's oak (*Quercus gambellii*) in central Colorado. *Oecology of Plants*, **2**, 241– 270.
  18. Ni, W., Woodcock, C. E. 2000. Effect of canopy structure and the presence of snow on the albedo of boreal conifer forests. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 11879–11888.
  19. Nias, R. C. 2013. Endangered Ecosystems. *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*, 169-175.
  20. Niinemets, U., M. Tobias, A. Cescatti ja A. Sparrow. 2006. Size dependant variation in shoot light-harvesting efficiency in shade-in- tolerant species. *International Journal Plant Science*, **167**, 19–32.
  21. Nilson, T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology*, **8**, 25–38.
  22. Nilson, T. ja J. Ross. 1997. Modeling radiative transfer through forest canopies: implications for canopy photosynthesis and remote sensing. *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity*, 23–60.
  23. Oker-Blom, P. 1985. The influence of penumbra on the distribution of direct solar radiation in a canopy of Scots pine. *Photosynthetica*, **19**, 312–317.
  24. Oker-Blom, P., Smolander, H. 1988. The ratio of shoot silhouette area to total needle area in Scots pine. *Forest Science*, **34**, 894–906.
  25. Pisek, J., Borysenko, O., Janoutova, R., Homolova, L. 2023. Estimation of coniferous shoot structure by high precision blue light 3D photogrammetry scanning. *Remote Sensing of Environment*, **291**, 113568.
  26. Pisek, J., Kuusk, A., Borysenko, O. 2024. Variation in the coniferous shoot structure with season, species using high precision blue light 3D photogrammetry scanning.
  27. Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. 391.

28. Running, S. W. ja J. C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, **42**, 125-154.
29. Ryu, Y., Verfaillie, J., Macfarlane, C., Kobayashi, H., Sonnentag, O., Vargas, R., Ma, S., Baldocchi, D. D. 2012. Continuous observation of tree leaf area index at ecosystem scale using upward-pointing digital cameras. *Remote Sensing of Environment*, **126**, 116-125.
30. Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud, A. Dalcher, 1986. A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, **43**, 505–531.
31. Shabanov, N. V., Y. Knyazikhin, F. Baret ja R. B. Myneni. 2000. Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, **74**, 125–144.
32. Shugart, H. H., Saatchi, S., Hall, F. G., 2010. Importance of structure and its measurement in quantifying function of forest ecosystems. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115.
33. Smolander, S. ja P. Stenberg. 2003. A method to account for shoot scale clumping in coniferous canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment*, **88**, 363–373.
34. Smolander, S. ja P. Stenberg. 2005. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sensing of Environment*, **94**, 355–363.
35. Stenberg, P. 1996. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. *Agricultural and Forest Meteorology*, **79**, 1–8.
36. Stenberg, P., Möttus, M., Rautiainen, M., Sievänen, R. 2014. Quantitative characterization of clumping in Scots pine crowns. *Annals of Botany*, **114**, 689–694.
37. Thérézien, M., Palmroth, S., Brady, R., Oren, R., 2007. Estimation of light interception properties of conifer shoots by an improved photographic method and a 3D model of shoot structure. *Tree Physiology*, **27**, 1375–1387.
38. Woodgate, W., Armston, J. D., Disney, M., Jones, S. D., Suarez, L., Hill, M. J., Wilkes, P., Soto-Berelov, M. 2016. Quantifying the impact of woody material on leaf area index estimation from hemispherical photography using 3D canopy simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, **226-227**, 1–12.

Töös on kasutatud geoloogia osakonna [bakalaureuse- ja magistritööde koostamise ning kaitsmise juhendit](#).

## LISAD

Võrsed	Võrsete kogupindala (mm <sup>2</sup> )	Rootsu pindala (mm <sup>2</sup> )	Okaste pindala (mm <sup>2</sup> )
1	1692,972595	318,003957	1374,96864
2	5306,945577	871,358882	4435,7967
3	3034,177127	886,249907	2147,92722
4	4814,41219	1390,382534	3424,02966

**Lisa 1.** Võrsete leitud pindalad *MeshLab* programmis

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Gregor Jeets,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

### **3D fotogramm-meetria abil kuuseokste ehituslike variatsioonide uurimine,**

mille juhendajad on Jan Pisek ja Oleksandr Borysenko,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Gregor Jeets*

**27.05.2024**